

Inovativni materijali i tehnologije u građenju i održavanju betonskih konstrukcija

Jovo Beslać, Dubravka Bjegović, Ružica Rosković

Ključne riječi

betonske konstrukcije, građenje, održavanje, inovativni materijal, inovativne tehnologije, primjena

Key words

concrete structures, construction, maintenance, innovative material, innovative technologies, application

Mots clés

structures en béton, construction, entretien, matériau innovateur, technologies innovatrices, application

Ключевые слова

бетонные конструкции, строительство, содержание, новаторские материалы, новаторские технологии, применение

Schlüsselworte

Betonkonstruktionen, Bauen, Wartung, innovativer Baustoff, innovative Technologien, Anwendung

J. Beslać, D. Bjegović, R. Rosković

Pregledni rad

Inovativni materijali i tehnologije u građenju i održavanju betonskih konstrukcija

Prikazani su suvremeni inovativni materijali i tehnologije koji se primjenjuju u građenju i održavanju betonskih konstrukcija. Prikazi se najviše odnose na inovativne materijale koji se krajem prošlog i početkom ovoga stoljeća javljaju pri građenju i održavanju betonskih konstrukcija. Autori ističu da značajnijih inovacijskih tehnologija i nema, nego se radi o poboljšanjima i proširenju područja primjene postojećih. Prikazana su i neka istraživanja iz tog područja autora članka.

J. Beslać, D. Bjegović, R. Rosković

Subject review

Innovative materials and technologies in the construction and maintenance of concrete structures

Modern innovative materials and technologies used in the construction and maintenance of concrete structures are presented. An emphasis is placed on innovative materials that have emerged at the turn of this century in the construction and maintenance of concrete structures. The authors stress that in fact no significant innovative technologies have been created over that period, and that developments were registered mostly in the scope of use and improvement of existing products. Some investigations the authors made in this area are also presented.

J. Beslać, D. Bjegović, R. Rosković

Ouvrage de syntèse

Matériaux et technologies innovatrices dans la construction et l'entretien des structures en béton

Les matériaux et technologies modernes et innovatrices, utilisées dans la construction et l'entretien des structures en béton, sont présentées. L'accent est mis sur les matériaux innovateurs qui ont apparu à la fin du dernier et au début de ce siècle dans la construction et l'entretien des structures en béton. Les auteurs affirment qu'en fait aucune technologie innovatrice d'importance n'a pas été créée dans cette période et que les développements n'ont pas été notés que dans l'étendue de la gamme et dans l'amélioration des produits existants. Quelques recherches faites dans ce domaine par les auteurs sont également présentées.

Ї. Беслач, Д. Бегович, Р. Росковић

Обзорная работа

Новаторские материалы и технологии в строительстве и содержании бетонных конструкций

В работе показаны современные новаторские материалы и технологии, применяемые в строительстве и содержании бетонных конструкций. Описания больше всего относятся к новаторским материалам больше всего появляющихся в строительстве и содержании бетонных конструкций в конце прошлого и начале этого столетий. Авторы подчёркивают, что более значительных новаторских технологий и нет, а речь идёт об улучшениях и расширении областей применения существующих. Показаны и некоторые исследования из той области авторов статьи.

J. Beslać, D. Bjegović, R. Rosković

Übersichtsarbeit

Innovative Baustoffe und Technologien beim Bauen und Wartung von Betonkonstruktionen

Dargestellt sind zeitgemässe innovative Baustoffe und Technologien die beim Bauen und Wartung von Betonkonstruktionen angewendet werden. Die Darstellungen beziehen sich meisstens Teils auf innovative Baustoffe die am Ende des vorigen und am Anfang dieses Jahrhunderts beim Bauen und Wartung von Betonkonstruktionen auftreten. Die Verfasser heben hervor dass es eigentlich keine bedeutenden innovativen Technologien gibt, sondern dass es sich um Verbesserungen und Erweiterungen der Anwendungsgebiete der bestehenden Technologien handelt. Dargestellt sind auch einige Forschungen die in diesem Gebiet die Verfasser durchführten.

Autori: Dr. sc. **Jovo Beslać**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet; mr. sc. **Ružica Rosković**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb

1 Uvod

Suvremena praksa inovacija u graditeljstvu razvija se danas u dva područja:

- inovativnih materijala i
- inovativne primjene klasičnih materijala.

Termin «inovativni materijali» odnosi se na materijale kojih su svojstva utvrđena najčešće laboratorijskim ispitivanjima i eksperimentalno potvrđena na građevinama, ali još uvijek nisu obuhvaćena odgovarajućim normama.

Inovativne tehnologije i primjena odnose se uglavnom na manje-više klasične ili već isprobane nove materijale, ali na inovativan način, koji rezultira poboljšanjem ponašanja u konkretnoj primjeni. Za razliku od inovativnih materijala, inovativna je primjena uglavnom obuhvaćena postojećim normama za materijale.

Istraživanja usmjerena tim pravcima rukovode se uglavnom potrebama kvalitete i trajnosti betonskih konstrukcija pri korištenju, ali se sve više mora voditi računa i o dostupnosti izvora pojedinih materijala, ekološkim potrebama, estetskim rješenjima i zaštiti zdravlja ljudi koji žive u takvim konstrukcijama ili pored njih.

Čini se da su i inovativni materijali i inovativne tehnologije i u istraživanju i u primjeni više prisutni u održavanju betonskih konstrukcija nego u izvedbi. Vjerojatno zbog toga što su problemi trajnosti i održavanja betonskih konstrukcija izuzetno veliki, skupi i sve teže rješivi (slika 1.). Cijene popravaka i održavanja pojedinih značajnih infrastrukturnih betonskih konstrukcija često znatno premašuju cijenu njihove prve izvedbe [1]. U rješavanju tih problema tržište je u posljednjih tridesetak godina preplavljeno takvim materijalima i tehnologijama, od kojih su mnogi već ušli u «tradicionalnu» primjenu i obuhvaćeni su odgovarajućim normama. Sam CEN (*Commite International de Norme*) ih je već objavio više od 60 (od kojih smo i mi već veći dio preuzeli).



Slika 1. Skupi popravak kolničke konstrukcije mosta preko Save u Ivanjoj Reci

2 Inovativni materijali

2.1 Proizvodnja i primjena betona

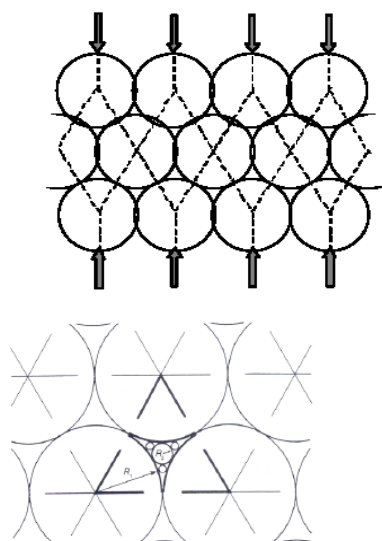
U proizvodnji i primjeni betona inovativni su ponajviše razni dodaci, u novije vrijeme i nove vrste betona.

Osnovni sastavni materijali

Vrlo interesantne promjene su se u drugoj polovini prošlog stoljeća događale i još uvijek se događaju u proizvodnji cementa. Na početku tog razdoblja proizvodilo se samo nekoliko tipova cementa. Osnovni (obični) portlandski cement bio je grube finoće mljevenja i mineralnog sastava karakterističnih za sporo rano očvršćivanje, ali veće konačne čvrstoće, što je rezultiralo kompaktnijom i trajnijom strukturom betona. Finoća mljevenja cementa prema Blaineu tada je bila oko 1000 cm²/g, a količina C₃S, dominantnog u ranom očvršćivanju, oko 30% [2]. Danas je ta finoća već dosegla pa i prešla 4000 cm²/g, a količina C₃S se popela na 50% do 60%. Kad je u ondašnjim odborima pripremana naša današnja osnovna norma za cimente HRN B.C1.011 sugerirano je da se finoća mljevenja ograniči na 3500 cm²/g, ali to nije prošlo. Očvrsla struktura betona se danas formira znatno brže, što pogoduje potrebi bržeg građenja, ali je grublja i poroznija, što mu umanjuje otpornost na prodor agresivnih tvari iz okoliša. Ondašnji betoni bili su u prosjeku otporniji i trajniji od današnjih. Naravno, ne samo zbog promjena u cementu.

Nova norma za cement HRN EN 197-1, nastala kao kompromis raznih želja zemalja članica CEN-a (od Portugala do Finske), obuhvaća čak 27 mogućih proizvoda u porodici cemenata, s otvorenom mogućnošću daljeg povećanja toga broja kombiniranjem količine i vrste mineralnih dodataka. Jedna od njih će npr. biti s mogućih 6-20% ili čak 21-35% vapnenačkog brašna finoće mljevenja oko 5000 cm²/g, pri čemu se taj dodatak ne smije poistovjetivati s do 100 puta finijom reaktivnom silicijskom prašinom, koja kao mineralni dodatak ima sasvim drugačiju ulogu. Neki noviji rezultati ispitivanja za sada nedvojbeno potvrđuju da dodatak do 5 % vapnenačkog brašna ne mijenja značajnije svojstva betona. Međutim 25% vapnenačkog brašna smanjuje i ranu i konačnu čvrstoću, a posebno otpornost na smrzavanje. Na karbonatizaciju i na sulfatnu koroziju utječe u mjeri u kojoj se smanjuje količina portlandskog cementa i time i trikalcijskog alumina [3]. Međutim, istraživanja sinergijskog učinka miješanih mineralnih dodataka cementu s povećanim udjelom vapnenačkog brašna, koja su u toku u okviru tehnološkog projekta Građevinskog fakulteta [4], pokazuju da uz povećanu finoću mljevenja (na oko 10000 cm²/g) vapnenačko brašno pozitivno djeluje i na ranu i na konačnu čvrstoću. Vjerojatno se radi o boljem pakiranju čestica punila kao jednom od uvjeta za dobivanje betona visokih čvrstoća, kod kojih se povoljnom kombinacijom zrna

osigurava direktni prijenos tlačnog opterećenja sa zrna na zrno, a slabiji cementni kamen preuzima samo bočne vlačne napone (slika 2.).



Slika 2. Shema prijenosa tlačnog opterećenja u betonu i shema optimalnog pakiranja zrna trofrakcijskog agregata [5]

Inovacije u sastavu cementa otvaraju brojne nove mogućnosti proizvodnje betona različite cijene i svojstava, ali je u njegovu izboru za konkretnu primjenu betona nužan oprez. U nas se npr. kao najaktualnije za izgradnju određenih dijelova pročistača otpadnih voda grada Zagreba traži sulfatno otporni portlandski cement i kao alternativa nudi uvozni metalurški cement sa 70% šljake iz visokih peći u sastavu cementa. Takav cement jest dobar za nearmirane masivne betone u sulfatno agresivnoj okolini, ali nikako ne za gusto armirane betone pročistača, jer je karbonatizacija takvog betona i opasnost od korozije armature tri puta brža nego u betona s običnim portlandskom cementom [6]. Zadovoljavajući na taj način hipotetičnu (ne dokazanu) opasnost od sulfatne korozije betona otpadnim vodama grada Zagreba sigurno bismo znatno ubrzali pouzdanu opasnost od korozije armature.

Inovacije u području agregata za beton su malobrojne. Reklo bi se: u agregatu ništa novo. U razvijenom je svijetu aktualno iskorištavanje recikliranog agregata, dobivenog ispiranjem otpadnoga svježeg betona ili drobljenjem otpadnoga očvrslulog betona i ostalih građevinskih materijala (tablica 1.).

Uporaba recikliranog agregata već je regulirana normom HRN EN 206-1, a iskorištavanje drobljenoga otpadnoga očvrslulog betona intenzivno se istražuje pa već i prakticira. Opsežan se projekt u tom području izvodi u Norveškoj [8]. Istražuju se i mehanička svojstva i trajnosni aspekti betona od recikliranoga betonskog agregata. Zaključci su za sada da svojstva beton od recikliranoga be-

tonskog agregata zadovoljavaju najopćenitije uvjete izloženosti betona okolišu.

Tablica 1. Europski podaci o proizvodnji i primjeni recikliranog agregata [7]

Država	God.	Materijal	mil. [m ³]	
			proizvedeno	upotrijebljeno
Švedska	1999.	asfaltni beton	0,8	0,76
Danska	1997.	rušenja zgrada	1,5 – 2,0	malo
		beton	1,06	0,9
		asfaltni beton	0,82	0,82
		keramika, opeka	0,48	0,33
Njemačka	1999.	beton	12,0	6,0
		asfaltni beton	10,7	10,7
		rušenja zgrada	9,2	9,2
		ostalo	23,0	4,0

Inovacija je njemački patentirani postupak proizvodnje površinski cementiranoga poroznoga laganog agregata od ekspandirane gline, koji ne upija vodu i omogućava nesmetan transport i ugradnju laganog betona [9].

Kemijski dodaci

U području kemijskih dodataka betonu nedavno je Udruženje kemijskih dodataka cementu predstavilo tri inovativna dodatka koje, djelujući samostalno ili u kombinaciji smatraju ključem mogućih novih rješenja primjene betona i u građenju i u održavanju [10].

Najznačajniji su polikarboksilatni superplastifikatori (na bazi polikarboksilatnih etera), koji dolaze s razvojem samougradivog betona. Od klasičnih sulfoniranih melaminskih ili naftalenskih superplastifikatora bitno se razlikuju i po kemijskoj osnovi i po načinu djelovanja. Omogućuju prilagođavanje svojstava i svježeg i očvrslulog betona konkretnim potrebama. Vremenski ograničena efikasnost djelovanja ovih prvih, sada već klasičnih superplastifikatora, uspješno se produžava i na nekoliko sati kod ovih drugih i to kombiniranim sastavom, takvim da kad prestane djelovanje jedne komponente počinje djelovanje druge. Značajna je novost efikasnog djelovanja ovih superplastifikatora i površina betona bez estetski i trajnosno često neugodnih zračnih pora.

Skupljanje je najneugodnije i neizbježno svojstvo očvršćivanja betona. Najveći njegov dio dolazi od evaporacije slobodne vode, dodane betonu radi osiguranja odgovarajuće obradivosti. Novi tip kompenzatora skupljanja ne djeluje bubrenjem betona u ranoj fazi očvršćivanja, nego sprječavanjem evaporacije vode, koja ga uzrokuje, odnosno sprječavanjem skupljanja omočenih površina kapilara pri evaporaciji vode. Naročito su efikasni u kom-

binaciji s prethodno navedenim superplastifikatorima nove generacije, kada uobičajeno skupljanje betona mogu reducirati za 30% do 70%.

Treći tip su inhibitori korozije armature, koji se jednako uspješno rabe i u građenju i u održavanju betonskih konstrukcija (i pri karbonatizacijskoj i pri kloridnoj koroziji). Mogu se dodavati u svježi beton ili sanacijski mort ili nanositi i penetrirati s površine betona prema armaturi.

Beton

Inovacije su najbrojnije i najintenzivnije u području samog betona, modificiranog brojnim novim dodacima i načinima ugradnje i očvršćivanja, a sve najviše radi podizanja nivoa njegove pouzdanosti pri iskorištavanju i smanjenju visokih troškova održavanja. Radi se o dodacima koji se dodaju u malim količinama (polimerna vlakna, fini praškasti materijali i sl.) i specifičnim proizvodnim procesima, često zasnovanim na postupcima izvedenim iz drugih tehnologija (keramičke, gumarske i sl.). Po mikrostrukтури i svojstvima ti materijali imaju malo zajedničkog s tradicionalnim betonom samo prisutnost vode i cementa.

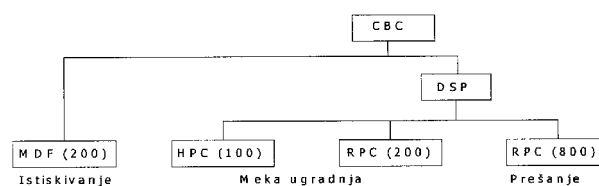
Velika grupa tih novih cementacijskih materijala javlja se pod zajedničkom oznakom CBC (*Chemically Bonded Ceramics* - kemijski vezana keramika), čime je kao prvo naznačena keramička kvaliteta tih materijala (anorganska a ne metalna) i kao drugo primarno kemijska priroda veze, koja se kao keramička uspostavlja uz reakciju vode sa silikatnom ili aluminatnom komponentom, i to pri običnim a ne povišenim temperaturama kao kod klasične keramičke veze. Međutim ni to nije sve. Značajnu ulogu pri tome ima i polimerna komponenta prisutna u znatnim količinama.

Osnovno svojstvo svih tih kompozita je visoka tlačna čvrstoća, kojoj su prvobitno i bili namijenjeni, a postizala se:

- reduciranim v/c omjerom (na 0,4 do 0,3) superplastifikatorima
- uporabom visokoaktivnih pucolanskih dodataka velike specifične površine
- drobljenim agregatom visoke kvalitete (bazaltnim, granitnim i sl.), koji osigurava visoku mehaničku otpornost tranzicijske zone (veze cementnog kamena i agregata).

CBC materijali uključuju različite tipove proizvoda, predodređenih za visoka mehanička svojstva dobivena odsustvom i najmanjih pogrešaka ili pora u mikrostrukтури cementnog kamena. Dvije su osnovne grupe: MDF (*Macro-Defect Free* - bez makro gešaka) i DSP (*Densified with Small Particles* - zgusnuti sitnim česticama) (slika 3.).

Načelon se, osim ostalog, razlikuju ulogom polimernog sastojka u proizvodnom procesu. U MDF materijalima prisutan je u vodi potpuno topivi polimer (polivinil alkohol, poliakrilamid, hidrometilceluloza) koji značajno modificira reologiju cementne paste prevodeći je u gumasti materijal podoban za oblikovanje tiskanjem ili valjanjem. Nasuprot tome sulfonatni ili akrilatni polimeri u DSP materijalima omogućuju oblikovanje prešanjem vlažnog praha ili njegovim mekim izlivanjem i vibriranjem. Po svom načinu oblikovanja izlivanjem u kalupe samo DSP materijali su iskoristivi u građevinarstvu (u proizvodnji kompleksnih velikoformatnih elemenata). Prvi su rezervirani za primjenu u sofisticiranijim područjima.



Slika 3. Shema inovativnih cementacijskih materijala i proizvodnih procesa; u zgradama su čvrstoće (vlačna za MDF, tlačna za HPC i RPC)

DSP materijali proizvode se i primjenjuju u dva podtipa: HPC (*High Performance Concrete* - beton visokih svojstava) i RPC (*Reactive powder Concrete* - beton od reaktivnog praha). HPC je do tlačne čvrstoće od 100 N/mm², a RPC, koji potencijalno reprezentira daljnji napredak HPC, ide do 200 i 800 N/mm². Prva čvrstoća dobiva se klasičnom «mekom» ugradnjom a druga prešanjem.

Među sad već dosta brojnim novim tipovima betona visoke kvalitete, o kojima se u nas već dosta i pisalo [11, 12 i 13], mogu se nabrojiti:

- betoni visoke čvrstoće
- betoni vrlo visoke čvrstoće
- betoni visokih svojstava
- hibridni betoni visokih svojstava
- samougradivi betoni
- zeleni (ekološki) betoni
- pametni betoni.

Pod pojmom zeleni betoni podrazumijeva se cijeli projekt različitih aktivnosti racionalizirane potrošnje cementa, čija proizvodnja oslobađa velike količine stakleničkih plinova.

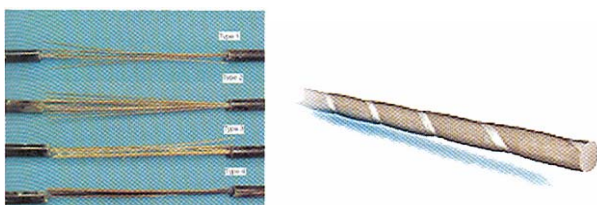
Interesantan je ovaj posljednji tip (*Smart concrete*), čiji se sastav komponira tako da sam iz sebe reagira na određena djelovanja i događanja u betonu i eliminira njihove negativne utjecaje. Takvi su npr. samozacjeljivi beton i beton samokontrole oslobađanja topline hidratacije [14]. Kod prvog se samozacjeljivanje pukotina postiže ugrad-

njom lomljivih cjevčica koje se pri pojavi pukotina lome i oslobađaju ljepilo koje brtvi pukotine, a kod drugog samoreguliranje temperature parafinskim mikrokapsulama, koje sadrže usporivač hidratacije cementa što se iz kapsula oslobađa pri određenoj temperaturi betona.

Armatura

I u području armature armiranog betona ima značajnih inovacija ili barem nastojanja unapređenja ovog područja.

Vlankima armirana (ojačana) plastika je materijal sastavljen od polimerne osnove (matrixa) armirane vlankima određenog omjera duljine i debljine. Prvi takav proizvod upotrijebljen kao betonska armatura pojavio se sredinom 1950-ih godina [15]. Ovaj materijal sastavljen od milijuna kontinuiranih organskih ili anorganskih vlakana udruženih i povezanih smolama ili posebnom cementnom pastom u usporedbi s konvencionalnom čeličnom armaturom ima nedvojbene prednosti kao npr.: visoku vlačnu čvrstoću, izvrsnu otpornost na koroziju, malu specifičnu težinu, nizak modul elastičnosti i odmjeren koeficijent temperaturne deformacije. Zbog visoke otpornosti na koroziju i sposobnosti prilagodbe specifičnim konstrukcijama sve više se uvodi u primjenu, posebno u značajnim i osjetljivim konstrukcijama. U literaturi je poznat pod oznakom FRP (*Fibre reinforced plastics*). Ako su vlakna staklena označavaju se kao GFRP, ako su karbonska kao CFRP, a aramidna kao AFRP. Ovisno o vrsti vlakana, vrsti vezne smole i obliku javljaju se na tržištu u velikom broju različitih tipova i mogućnosti. U građevinarstvu se danas kao armatura najviše rabe staklena, karbonska i aramidna vlakna (slike 4. i 5. i tablica 2.)



Slika 4. GFRP armatura prije i poslije loma [16]

Ovisno o vrsti vlakana, vrsti vezne smole i obliku pojavljuju se na tržištu u velikom broju različitih tipova i mogućnosti.



Slika 5. Primjena CFRP armature u prednapetim pločama [17]

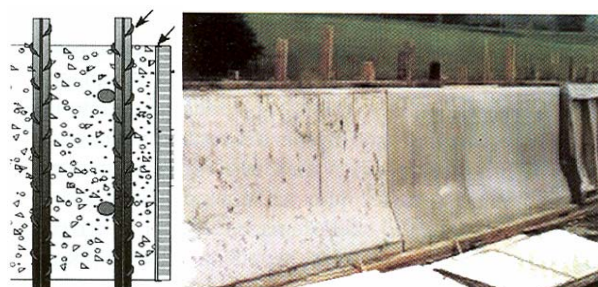
Tablica 2. Usporedba mehaničkih svojstava FRP i čelika (ACI 440.1R-01)

	Čelik	GFRP	CFRP	AFRP
Nominalni napon popuštanja, MPa	276–517	NA	NA	NA
Vlačna čvrstoća, MPa	482–689	482–1585	600–3688	1724–2537
Statički modul elastičnosti, $\times 10^3$ MPa)	200	35–51	103–579	41–125
Deformacija popuštanja, [%]	1.4–2.5	NA	NA	NA
Konačna deformacija, [%]	6–12	1.2–3.1	0.5–1.9	1.9–4.4

U području klasične čelične armature inovacije su uglavnom u novim procesnim tehnologijama koje joj povećavaju inače nisku otpornost na visoku temperaturu, žilavost i kemijsku otpornost [18].

Oplata

U području oplata inovativna je tehnologija primjene apsorpcijske oplata ili apsorpcijske tkanine uz unutarnje lice oplata (slika 6.). ApSORPCIJOM zraka i dijela vode iz površinskog sloja betona povećava se njegova gustoća, a time i mehanička otpornost i nepropusnost te trajnije štiti armaturu od korozije [19].



Slika 6. Struktura površine betona u klasičnoj i apsorpcijskoj oplati [20]

2.2 Popravci i zaštita betonskih konstrukcija

Ovo je bez sumnje danas najaktualnije i najkontroverznije područje građenja u betonu. Vrlo je skupo i na žalost i uz visoku cijenu problematično efikasno. Kad je na nedavno održanom Internacionalnom simpoziju «*Durability and Maintenance of Concrete Structures*» u Dubrovniku danski kolega J. Holst u raspravi nakon izloženih brojnih pokušaja popravka jednog njihova mosta i pitanja iz auditorija očajno izjavio da ne vidi rješenje, u dosta brojnom auditoriju ostao je samo muk [21].

Kad su se gospodarstva razvijenih zemalja s problematičnom trajnošću betonskih konstrukcija i potrebom njihove zaštite na dramatičan način (po visokim troškovi-

ma njihova održavanja) prvi put suočila prije nekoliko desetljeća, tržište je vrlo brzo preplavljeno različitim materijalima, sustavima i tehnologijama koji su gotovo svi nudili efikasna i prema njima procijenjena jeftina rješenja. Međutim, vrlo se brzo uvidjelo da to baš i nije tako. Od tada pa sve do danas ulažu se golemi naponi i troše značajna sredstva za istraživanje, sređivanje i normiranje toga stanja. Mnogi od tih materijala su već postali «klasični» i normativno sređeni. Navedeno je prethodno da je CEN u tom području već donio oko 60 norma od kojih smo i mi preuzeli velik dio. Oko dvadesetak ih je još u pripremi. Grubo bi se ti materijali i tehnologije mogli razvrstati:

- materijali i tehnologije površinske zaštite (sanacijskim mortovima i premazima)
- elektrokemijski postupci
- korozijski inhibitori
- impregnacijski materijali.

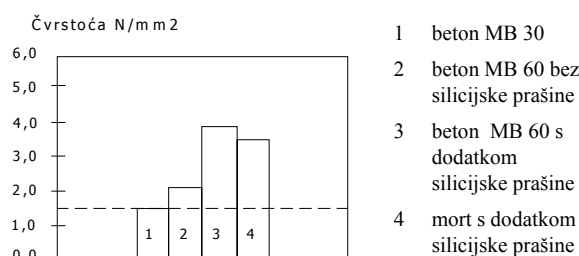
Međutim, nedvojbeno su za trajne konstrukcije i niske troškove održavanja najvažniji dobra projektna rješenja i kvalitetan beton, posebno njegov površinski dio koji je izravno izložen utjecaju okoliša i koji štiti armaturu od korozije.

Materijali i tehnologije površinske zaštite

Tržišni je asortiman sredstava površinske zaštite (sanacijskih mortova i premaza) najbrojniji i najraznovrsniji. Osnovni problemi koji ih prate u primjeni su: prionljivost i općenito kompatibilnost s podložnim betonom, skupljanje i nepropusnost, specifično nepropusnost klorida i sličnih agresivnih tvari iz okoliša. Prve, tzv. polimer cementne formulacije nisu su se potvrdile u primjeni, ni kod mortova ni kod premaza. Ni jedni ni drugi nisu zadovoljili ni jedno od tri navedena svojstva. Akriлатne disperzije, kojima su najčešće modificirani, nisu za to bile dovoljne. Propusnost i skupljanje reducirale su u mjeri u kojoj su reducirale količinu vode, a prionljivost držale na nivou najčešće nedovoljnih 1,0 do 1,5 N/mm². Tek novijim inovativnim dodacima superplastifikatora, silicijske prašine, mikroarmature (vlakana) i sredstava za reduciranje skupljanja blokiranjem rane evaporacije vode navedena svojstva su im bitno poboljšana.

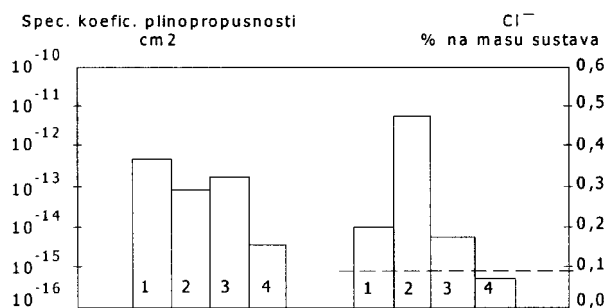
Dodatkom silicijske prašine, koja homogenizira i pojačava kontaktnu zonu sa zrnima agregata i podložnog betona, prionljivost im je podignuta iznad 2,5 N/mm², što je približno jednako čvrstoći dobrog betona na otkidanje (slika 7.).

Umjesto krutih polimernih cementnih premaza u primjenu su inovativno nedavno uvedeni čisto polimerni (akriлатni ili epoksidno poliuretanski) i to oni bez razrjeđivača i otapala, kod kojih evaporacijom ne ostaje porozna i



Slika 7. Histogram utjecaja dodatka silicijske prašine na vezu novog betona ili morta sa starim [22]

propusna strukturu. Trajno su elastoplastični pa premošćuju i pukotine otvora do 1,0 mm. Prema našim iskustvima prilično su efikasni u usporavanju karbonatizacije kvalitetnog betona ali ne i u usporavanju prodora klorida u beton, pri čemu nije zabilježena ni očekivana korelacija između plinopropusnosti i prodora klorida u sustav (slika 8.).



- 1 beton razupore velikog luka Krčkog mosta star 10 godina
- 2 polimer cementni sanacijski sustav star 5 godina
- 3 mlazni mort bez premaza star 5 godina
- 4 noviji sanacijski sustav s polimernim premazom star 5 godina

Slika 8. Histogrami plinopropusnosti i prodora klorida u neke tipove betona i sanacijskih sustava debljine 2,5 cm

Elektrokemijski postupci

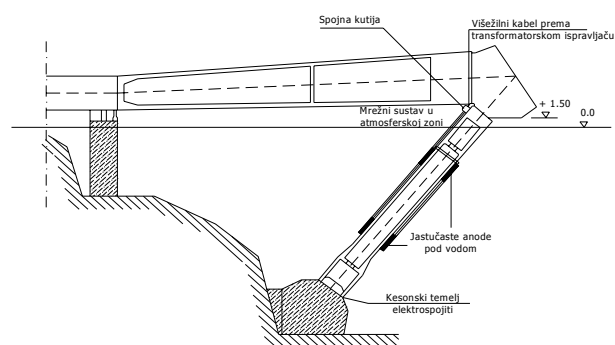
Dva su osnovna postupka:

- katodni s ugrađenim elektrodama i napajanjem strujom iz vanjskog izvora
- galvanski anodni, koji se koristi metalom manjeg elektrootpora od čelika (cink, aluminij ili njihove legure), naljepi se na površinu betona i oslobađajući elektrone prema armaturi žrtvuje se (troši), a čelik štiti.

Prvi se postupak u betonu primjenjuje već više od pola stoljeća, ugradnjom u beton čeličnih elektroda, što je praćeno s dosta problema i teškoća. Najveći broj tih teškoća i problema eliminiran je inovativnim površinskim elektrodama, uvedenim u primjenu krajem prošlog stoljeća. Najčešće su to titanske mreže, koje se ugrađuju na površinu betona i učvršćuju sanacijskim (najčešće mlaznim) mortom, ili elektrovodljivi premazi. Izbor anode kod konstrukcija na otvorenom ovisi o elektrootporu betona i količini elektrolita u betonu koji treba provesti struju do armature. No, sam postupak i primjene i kasni-

jeg održavanja katodne zaštite prilično je složen i osjetljiv, vrlo sofisticiran.

Primjena ovog prvog postupka priprema se u nas na kosnicima temelja mosta velikog luka Krčkog mosta. Rješenje se projektira u francuskoj kompaniji *Freyssinet*, odnosno u njima pridruženoj britanskoj kompaniji *Corrosion Control Services Ltd*, a objedinjavat će dva postupka: površinsku titansku mrežu na dijelu kosnika iznad srednjeg nivoa mora i tzv. odmaknute jastučaste elektrode na podmorskom dijelu (slika 9.).



Slika 9. Shema prijedloga katodne zaštite kosnika temelja mosta velikog luka Krčkog mosta

Drugi (galvanski anodni) postupak novijeg je datuma i još je u inovativnoj (zaštićenoj) eksperimentalnoj primjeni. Idejno djeluje vrlo jednostavno. Pokušavali smo ga preko zastupnika nekih zaštićenih postupaka primijeniti i na Krčkom mostu, ali je sve ostalo na njihovim obećanjima i preporukama. Na konkretnu primjenu i garantiranu efikasnost nisu još spremni. Prednost mu je što se može primijeniti lokalno, bez potrebe pune elektropovezanosti i vodljivosti armature.

Slični katodnoj zaštiti su i postupci realkalizacije i dekloridizacije zaštitnog sloja betona, rabe privremenu istosmjernu struju veće jakosti, koja u prvom slučaju forsira impregniranje betona odgovarajućim elektrolitom i oslobađanje hidroksilnih iona u zoni armature, a u drugom odbijanje kloridnih iona od armature i njihovo migriranje prema površini. Postupci su još uvijek vrlo inovativni i licencno zaštićeni.

Korozijski inhibitori

Primjenjuju se već dugo vremena u raznim industrijama. U armiranom betonu oni inovativniji razvijeni su tek nedavno, ali se već dosta masovno i preporučuju pa i primjenjuju. U igri su tri osnovna tipa:

- nitritni
- aminski
- monoflorfosfatni.

Nitritni su najstariji. U bivšem Sovjetskom Savezu rabili su ih već polovinom prošlog stoljeća radi neutraliziranja kloridne stimulacije korozije armature pri primjeni kloridnih dodataka za zimsko betoniranje. Djelovanje im se i zasniva na vezanju i neutraliziranju korozijskog djelovanja klorida, što znači da je u betonu nužno postići njihovu dovoljnu koncentraciju i homogenu raspodjelu, što nije jednostavno. Danas su ih iz primjene značajno potisnula druga dva tipa, uvedena u primjenu posljednjih godina. Upotrebljavaju se i kao dodaci svježem betonu i kao penetracijski, koji se nanose na površinu betona s koje penetriraju prema armaturi.

Aminski inhibitori formiraju oko armature zaštitnu opnu, a monoflorfosfatni stimuliraju njezino formiranje i u prisutnosti klorida i karbonatizacije. Kod ovih drugih jedan manji dio u površinskom sloju betona debljine nekoliko mm reagira s kalcijevim hidroksidom i karbonatom i formira vrlo čvrste i stabilne minerale apatita te time konsolidira ovo područje bez značajnijeg utjecaja na njegovu paropropusnost. Nanosi se na površinu u nekoliko navrata. Elektronskim mikroskopom utvrđena je njegova penetracija u beton 30 do 50 mm, kolika uobičajeno i jest debljina zaštitnog sloja betona [15].

Impregnacije

Impregnacije betona s nekim sada već klasičnim materijalima kao što su silikoni, akrilati, epoksidi i sl. već su od ranije poznati. Djelovanje im nije bilo ni naročito efikasno ni dovoljno trajno. Novijeg datuma su vodoodbojne impregnacije betona silanima ili siloksanima, koji zbog vrlo jednostavne strukturne građe (u prvom slučaju monomerni tj. jednomolekularni, a u drugom oligomerni, tj. dvomolekularni ili tromolekularni) penetriraju znatno dublje u površinski sloj betona [23]. Polimerizacijom u porama betona u konačnici kao silikonska polimerna zaštita:

- formiraju vodoodbojni film u površinskom sloju betona
- sprječavaju prodor vode i klorida, a omogućuju evaporaciju vlage
- penetriraju, u određenoj mjeri, u pore betona
- obično ne usporavaju karbonatizaciju betona
- iako ne sadrže pigmente boje mogu lagano izmijeniti boju betona.

2.2 Ojačanja betonskih konstrukcija

Najznačajnija inovacija koja se posljednjih godina pojavila u području sanacija i ojačanja betonskih konstrukcija je vlaknima ojačana plastika FRP (*Fibre reinforced plastics*). Radi se o kompozitnom materijalu pri kojem

je polimerna osnova armirana vlaknima određenog omjera duljine i promjera (debljine) pri čemu su kontinuirana vlakna mnogo čvršća od polimerne osnove. Prednosti pred klasičnom čeličnom armaturom su im dosta brojne:

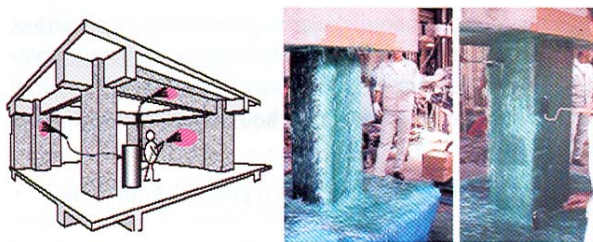
- velika vlačna čvrstoća
- izvrsna otpornost na koroziju
- mala specifična težina
- relativno nizak modul elastičnosti
- izvrsno ponašanje pod opterećenjem i prihvatljiv koeficijent temperaturne deformacije.

Proizvodne (tržišne) kombinacije su vrlo brojne, ovisne i o vrsti vlakana i o polimernom vezivu u osnovi. Kao vlakna najčešće se rabe staklena, karbonska i aramidna, a kao ljepila epoksidna i poliesterska.

Karbonska vlakna su kao konstrukcijski materijal vrlo obećavajuća. Imaju stabilnu molekularnu strukturu i gotovo neograničenu sirovinsku bazu.

U ojačavanju betonskih konstrukcija najviše se rabe karbonske trake, koje se epoksidnim smolama lijepe na vlačno opterećene dijelove konstrukcije. Trake različitih dimenzija se po smjeru vlakana odabiru ovisno o namjeni, a mogu biti jednosmjerne, dvosmjerne (položene ortogonalno) i kvadrismjerne. Danas se već prilično rašireno primjenjuju pa pojedini proizvođači nude i proračunske računalne programe i upute za primjenu.

Japanci se npr. za protupotresno ojačanje konstrukcija koriste mlaznim postupkom primjene polimera ojačanog vlaknima (slika 10.).



Slika 10. Protupotresno ojačanje konstrukcija nanošenjem polimera ojačanog vlaknima mlaznim postupkom u Japanu [24]

3 Inovativne tehnologije

Čini se da ovdje značajnijih inovacija nema. Više se radi o određenim tehnološkim poboljšanjima ili proširenju područja primjene klasičnih tehnologija.

Tipičan takav primjer jest mlazni beton, koji se iz klasičnog područja primjene u tunelogradnji i zaštiti tla od odronjavanja u usjecima i na pokosima proširio u gotovo sva područja građenja betonom, osobito u održavanju betonskih konstrukcija. Primjenjuje se na dva načina:

kao klasični suhi i noviji mokri način. I jedan i drugi imaju kontroliranu i sofisticiranu pripremu suhe smjese, ali kod prvog potrebnu količinu vode dodaje mlazničar na mlaznici po svom osjećaju i iskustvu, a kod drugog se i voda dodaje u kontroliranoj pripremi svježe smjese, pa je utoliko taj postupak i kvalitetniji i pouzdaniji u postizanju uvjetovane kvalitete ugrađene smjese. I radni uvjeti primjene ovog drugog postupka su znatno povoljniji (naročito u zatvorenom prostoru), jer nema prašine, a budući da je značajno reduciriran odskok i gubitak smjese, sama suha smjesa može uz istu cijenu biti, a i jest, kvalitetnija.

Značajne inovacije u ovom drugom slučaju su razni dodaci s kojima se određena svojstva svježe smjese prilagođavaju načinu i dinamici ugradnje, a i svojstva ugrađene smjese načinu površinske obrade i uvjetima iskorištavanja, odnosno opterećenja i djelovanja okoliša. Najznačajniji među njima su regulatori vezanja i očvršćavanja i dodaci za kompenziranje skupljanja, koji mogu biti na osnovi ranog bubrenja smjese ili još bolje na osnovi sprječavanja rane evaporacije vlage iz ugrađene smjese.

Priprema seta norma za mlazni beton je u CEN-u u završnoj fazi. Javna rasprava o tim normama je upravo u tijeku u zemljama članicama.

Slične su inovacije i u tehnologiji proizvodnje i primjene mikroarmiranih sanacijskih mortova i betona, značajno poboljšanih svojstava i ponašanja u primjeni u usporredbi s klasičnim. Značajna su poboljšanja postignuta u povećanoj prionljivosti i čvrstoći a reduciranom skupljanju. Prisutna mikroarmatura osim što povećava vlačnu čvrstoću i elastičnost morta značajno mu povećava i duktilnost pa time i sposobnost držanja vlačnog opterećenja i nakon pojave pukotina (slika 11.).



Slika 11. Stup S27 Krčkog mosta ojačan i zaštićen u podnožju mikroarmiranim betonom MB 75

Određene inovacije su već u točki 2.1 spomenute primjene apsorpcijskih oplata i tkanina radi poboljšanja kvalitete i izgleda površinskog sloja betona koji najčešće i najviše predodređuje trajnost armiranobetonskih konstrukcija, te uporaba recikliranog agregata, dobivenog iz otpadnih zidarskih ili betonskih materijala.

Vrlo interesantan inovativni postupak, najavljen ovih dana iz Sjedinjenih Američkih Država je zaštite čeličnih stupova od požara zapunjavanjem betonom, najefikasnije, čini se, mikroarmiranim [24].

LITERATURA

- [1] Bolin, J.; Lindbladgh, L.; Nilson, P. A.: *The management of the Eland Bridge – A Challenge to the Bridge Owner*, Proceedings of the International Conference on «Repair of Concrete Structures, From theory to Practice in a Marine Environment, Svolve, Norway, 1997., pp 69-79
- [2] Mehta, P.K.: *Durability of Concrete – Fifty Years of Progress*, Proceedings of CANMET/ACI International Conference, Montreal, 1(1991.), pp 1-31
- [3] Mathews, J. D.: *Performance of Lime Stone Filler Cement Concrete*, Euro-Cements, Impact of ENV 197 on Concrete Construction, E and FN SPON, London, 1994., pp 113-147
- [4] Bjegović, D. i Rosković, R.: Tehnologijski projekt broj TP 01/0082-04 (Miješani cementi za ekološke betone), Građevinski Fakultet u Zagrebu, 2004.
- [5] Walraven, J. C.: *Concrete for a New Century*, Proceedings of the First fib Congress 2002 «Concrete Structures in the 21st Century, Volume 1, pp11-22
- [6] Jones, M. R.: *Performance in Carbonating and Chloride-bearing Exposures*, Euro-Cements, Impact of ENV 197 on Concrete Construction, E and FN SPON, London, 1994., pp 113-147
- [7] Oikonomou, N. D.: *Recycled concrete aggregates*, Cement and Concrete Composites, March, 2004.
- [8] Petković, G.; Mehur, J.; Synnove, A. M.: *Recycled concrete aggregate – Durability aspects*, Proceedings of International Symposium «Durability and Maintenance of Concrete Structures», Dubrovnik, Croatia, 2004., pp 495-504
- [9] Müller, H. S.; Linsel, S.: *New Materials and Technologies for the Protection of High-Performance Light Weight Concrete*, Proceedings of the fib Symposium on «Structural Concrete – The Bridge Between People», Prague, 1999., pp 691-696
- [10] Cement Admixtures Association: *Admixtures developments providing concrete solutions*, Concrete Engineering International, Volume6, N°4, Winter 2002/03, pp 54-55
- [11] Beslač, J.: *Beton u novom stoljeću*, Građevinar, 54 (2002) 1, str. 15-22
- [12] Bjegović, D.; Skazlić, M.; Čandrić, V.: *Croatian experience with RPC*, Proceedings of the 6th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Wancouper, Canada, pp 355-362
- [13] Skazlić, M.; Bjegović, D.; Mrakovčić, S.: *Mikroarmirani beton visokih uporabnih svojstava*, Građevinar, 56(2004)2, str.69-77
- [14] Mihashi, H.; Nishiwaky, T.; Kaneko, Y.; Nishiyama, N.: *Development of Smart Concrete*, Proceedings of the First fib Congress 2002 «Concrete in the 21st Century», Volume 7, pp 43-44
- [15] Comité technique des Ponts et autre Ouvrages routiers (C11): *Utilisation de Matériaux Innovations pour la Construction et la Réparation des Ponts*, AIPCR, 2002
- [16] Kocaoz, S.; Samaranayake, V. A.; Nanni, A.: *Tensile characterization of glass FRP bars*, Composites Part B: Engineering, Volume 36, Issue 2, March 2004., pp 127-134
- [17] *Performance Evaluation of Various Corrosion Protection Systems of Bridges in Colorado*, Report N° CDOT-DTD-R-2004-1, Colorado Department of Transportation Research Branch, January, 2004.
- [18] James, A.: *New stainless steel alloy with implications for the reinforced concrete*, Concrete Engineering International, Volume 8, N°4, Winter 2004, pp 24-25
- [19] Ajdukiewicz, A. B.: *Durability aspects of RC members formed against permeable formwork*, Proceedings of International Symposium «Durability and Maintenance of Concrete Structures», Dubrovnik, Croatia, 2004., pp 387-394
- [20] Malone, G. P.: *Use of Permeable Formwork in Placing and Curing Concrete*, Technical Report SL-99-12, October 1999., U.S. Army Engineer Research and Development Center, Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS 39180-6199
- [21] Holst, J.; Buhr, B.: *The Langeland Bridge, Denmark Pilot Project Using Cathodic Protection as Basis for Overall Repair Strategy*, Proceedings of International Symposium «Durability and Maintenance of Concrete Structures», Dubrovnik, 2004., pp 643-650
- [22] Beslač, J.; Hranilović, M.; Potočnjak, Ž.: *High performance concrete in Croatia*, Croatian National Report on XIII FIP Congress, Amsterdam, 1998., pp 141-147
- [23] De Puy, G. V.: *Protection of Concrete with Sealing Compounds*, Proceedings of International ICPIIC Workshop on Polymers in Concrete, Bled, 1996, pp 53-60
- [24] <http://www.kz.tsukuba.jp/~kanakubo/spray/icci2002.pdf>
- [25] Kodur, V.: *Achieving fire resistance in steel columns through concrete filling*, Concrete Engineering International, Volume 8, N°4, Winter 2004, pp 50-53